Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 1, Apr. May. 2020, p. 57- 72

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1399، ص. 72-57

تجزیه و تحلیل پروفیل بافتی (TPA) برش‌های سیب خشک‌شده با پرتودهی مادون قرمز با روش حرارت‌دهی متناوب

حسن صباغی[1]- امان محمد ضیائی‌فر[2*]- مهدی کاشانی‌نژاد[3]

تاریخ دریافت: 1397/01/21
تاریخ پذیرش: 1398/02/09

چکیده

بافت از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی میوه‌ها طی خشک‌کردن است. آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت (TPA) برای بافت‌های بیولوژیکی ناهمگن بسیار مناسب است و همبستگی مناسبی با ارزیابی حسی نشان می‌دهد. در این پژوهش، بافت برش‌های سیب آب‌زدایی‌شده با پرتودهی مادون قرمز در سه دمای سطحی 70، 75 و 80 درجه سانتی‌گراد مطالعه شد. محصول در سه ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر تا دستیابی به سطح نهایی رطوبت برابر با 15، 20 و 25 درصد بر حسب وزن مرطوب خشک شد. سپس، آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت (TPA) با فشردن تا 50 درصد تغییر شکل با دستگاه بافت‌سنج انجام‌گرفت. ارزیابی حسی برش‌های خشک‌شده نیز از نظر بافت مطلوب و پذیرش کلی صورت پذیرفت. جهت تجزیه و تحلیل آماری از طرح کاملاً تصادفی (CRD) در قالب فاکتوریل (3^3) و آزمون دانکن با سطح اطمینان 95 درصد استفاده شد. نتایج نشان داد که خشک‌کردن تا سطوح رطوبتی مورد مطالعه موجب کاهش سختی و چسبندگی و افزایش فنریت، انسجام، شاخص صمغی، قابلیت جویدن و قابلیت ارتجاعی نسبت به بافت سیب خام شد. پذیرش کلی و بافت مطلوب در نمونه‌های خشک‌شده در شدت کم تبخیر (دمای کمتر، ضخامت کمتر و سطح رطوبتی بیشتر) ملاحظه گردید. سختی بافت برش سیب در این شرایط برابر با 7/685 ±695/177 گرم بود. با افزایش ضخامت برش‌ها، انسجام و فنریت کاسته شد و در نتیجه قابلیت جویدن به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافت. طی خشک‌کردن رفتار بافت از ویسکوالاستیک (سختی اولیه بالاتر و انسجام، فنریت و قابلیت ارتجاعی پایین‌تر) به الاستیک و سپس به پلاستیک یا شیشه‌ای تغییر کرد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، تجزیه و تحلیل پروفیل بافت، سیب، پرتودهی مادون قرمز، ارزیابی حسی

مقدمه

بافت از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی موادغذایی خشک‌شده است که نشان‌دهنده خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری محصول می‌باشد. خواص ریزساختاری میوه‌ها به میزان زیادی تحت تاثیر شرایط خشک‌کردن است و تغییرات بافتی غیرقابل بازگشت به‌طوری سریع طی خشک‌کردن اتفاق می‌افتند که احتمال وقوع تخریب بافت را افزایش می‌دهند. بنابراین کنترل توسعه بافت طی خشک‌کردن می‌تواند در بهبود کیفیت بسیار مفید باشد (Martynenko & Janaszek, 2014). زیرا در صنایع غذایی خصوصیت کیفی محصول نهایی، به صورت برآیندی بین چندین پارامتر شامل خواص حسی (بافت و رنگ) و خصوصیات تکنولوژیکی و بهداشتی سنجیده می‌شود. مدیریت این خصوصیات از مرحله تولید، با هدف کنترل آن‌ها، کار آسانی نیست (Perrot *et al.*, 2006).

یکی از فرآیندهای نوین در صنعت غذا، عملیات هم‌زمان بلانچینگ خشک مادون‌قرمز و آب‌زدایی[4] (SIRDBD) میوه‌ها و سبزیجات با روش حرارت‌دهی متناوب در دمای ثابت می‌باشد که موجب افزایش کیفیت محصول نهایی می‌گردد (Zhu *et al.*, 2010; Toğrul, 2006). خشک‌کردن و آب‌زدایی میوه‌ها و سبزیجات از عملیات واحد معمول در صنعت غذا است (Funebo *et al.*, 2000). این فرآیند با کاهش فعالیت آبی، موجب حداقل‌سازی تغییرات فیزیکی و شیمیایی طی انبارش می‌گردد (Mayor & Sereno, 2004). تجاری‌سازی و دسترسی به میوه‌ها و سبزیجات به صورت اسنک و به‌عنوان محصولات آماده مصرف[5] اهمیت زیادی دارد (Velickova *et al.*, 2014). سیب نیز ماده‌ای فسادپذیر است و با توجه به این‌که اتلاف زیاد این میوه در صورت اشباع بودن فصلی بازار مشاهده می‌شود؛ خشک‌کردن آن اهمیت دارد (Falade & Aworh, 2004). حفظ خصوصیات کیفی سیب در فرآوری حرارتی اهمیت زیادی دارد (Vega-Gálvez *et al.*,

1، 2 و 3- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری، دانشیار و استاد، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
(* - نویسنده مسئول: Email: ziaiifar@gmail.com)

DOI: 10.22067/ifstrj.v15i5.71974

4 Simultaneous infrared dry-blanching and dehydration
5 Ready to eat

López *et al*., 2010; 2012). فرآیند خشک‌کردن ضمن کاهش وزن محصول موجب کاهش فضای مورد نیاز برای نگهداری آن خواهد شد (Cuccurullo *et al*., 2012).

از روش‌های زیادی برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک میوه‌های خشک‌شده استفاده شده‌است. مدل‌های فشار یا ماکسول[1] برای توصیف بافت در سیستم‌های همگن[2] یا همسان‌گرد[3] استفاده‌شده‌اند. در مقابل آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت[4] (TPA) برای بافت‌های بیولوژیکی ناهمگن[5] و مواد غذایی بسیار مناسب است و اهمیت زیادی از نظر خواص حسی برای مصرف‌کننده دارد. این آزمون همبستگی مناسبی با داده‌های مربوط به آزمون‌های حسی دارد. شاخص‌هایی از جمله سختی[6]، چسبندگی[7]، فنریت[8] یا برگشت‌پذیری[9]، انسجام[10]، حالت صمغی[11]، قابلیت جویدن[12] و قابلیت ارتجاعی[13] برای بافت در این آزمون قابل بررسی هستند (Martynenko & Janaszek, 2014; Maity *et al*., 2012). Krokida و همکاران (2000) دو دوره تغییرات را برای پارامترهای بافتی در سیب طی خشک‌کردن با هوای داغ گزارش کردند که به صورت کاهش سختی در آغاز خشک‌کردن و افزایش سختی در محتوی رطوبت کمتر از 1/8 gr/gr,db بود. Khin و همکاران (2007) خصوصیات بافتی برش‌های مکعبی سیب پوشش‌داده‌شده با مالتودکسترین را طی آب‌زدایی اسمزی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بافت سیب به طور معنی‌داری تحت تاثیر هم‌بستگی ساختاری سلول‌ها و محتوی نهایی آب محصول است. Martynenko و Janaszek (2014) تغییرات بافتی برش‌های سیب را طی خشک‌کردن با هوای داغ بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که تغییرات بافتی سیب به‌ترتیب در سه فاز مختلف به صورت دوره نرم شوندگی، سختی یکنواخت و دوره سخت‌شدن اتفاق می‌افتد. در دوره سخت‌شدن پارامترهای بافتی وابستگی زیادی به دما دارند. Chong و همکاران (2014) آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافتی را روی برش‌های مکعبی سیب خشک‌شده با روش‌های ترکیبی پمپ حرارتی و مایکروویو در خلاء انجام دادند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن ترکیبی با کاربرد مایکروویو و خلاء کمترین میزان سختی و قابلیت جویدن را موجب شد.

در این پژوهش، برای نخستین بار تجزیه و تحلیل بافتی برش‌های سیب خشک‌شده با حرارت‌دهی مادون قرمز انجام می‌گیرد. بدین منظور در مرحله اول، خشک‌کردن برش‌های سیب با ضخامت مختلف با پرتودهی در دماهای سطحی ثابت تا دستیابی به میزان رطوبت خاص انجام خواهد شد. در مرحله دوم، تجزیه و تحلیل دستگاهی بافت صورت می‌پذیرد. در مرحله سوم، ارزیابی حسی بافت انجام می‌گیرد و در نهایت ارزیابی بافت و پذیرش مطلوب محصول با داده‌های دستگاهی قابل انطباق خواهد بود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی برش‌های سیب

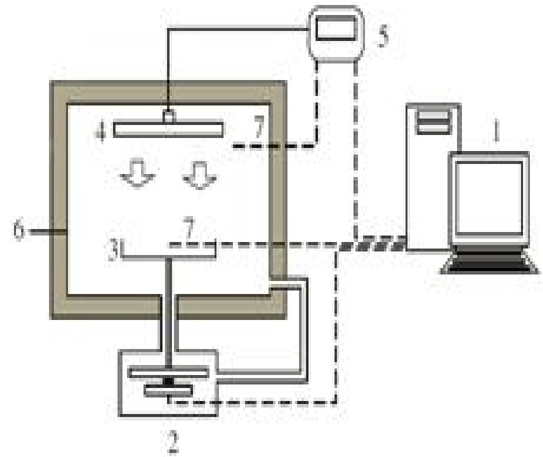
سیب واریته زرد لبنانی[14] از بازار محلی خریداری شده و مطابق Acevedo و همکاران (2008) در دمای 1± صفر درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 95-90 درصد نگهداری شد. قبل از هر فرآیند حرارتی، نمونه‌های سیب از سردخانه خارج شده و پس از رسیدن به دمای محیط مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌ها به‌صورت دستی پوست‌گیری شده و سپس در سه اندازه به صورت برش‌هایی با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر و با قطر 20 میلی‌متر آماده گردید. برش‌های سیب بلافاصله وارد عملیات همزمان بلانچینگ و خشک‌کردن مادون‌قرمز شدند.

عملیات حرارت‌دهی متناوب توسط خشک‌کن مادون قرمز

شکل 1 اجزای سیستم خشک‌کن اتوماتیک مادون‌قرمز مورد استفاده را مطابق سیستم Liu و همکاران (2014) نشان می‌دهد. این خشک‌کن شامل یک محفظه مکعب مستطیل بود. منبع تابش مادون قرمز از نوع سرامیکی با توان 1000 وات در داخل این محفظه قرار گرفت. فاصله محل قرارگیری نمونه تا منبع تابش برابر با 35 سانتی‌متر بود. دمای سطحی نمونه در محفظه خشک‌کن به‌طور مداوم با استفاده از ترموکوپل نوع K و سیستم کنترل‌کننده الکترونیکی (PLC، دلتا، آلمان) به‌صورت کنترل‌کننده تناسبی، انتگرال-مشتق‌گیر[15] یا PID کنترل می‌گردد. جهت عملیات حرارتی متناوب مطابق آنچه Zhu و همکاران (2010) انجام دادند، سه دمای سطحی ثابت برابر با 70، 75، 80 درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. جهت انجام آزمون بافت‌سنجی و ارزیابی حسی، برش‌های سیب پس از توزین اولیه در داخل خشک‌کن قرار گرفتند و تا دستیابی به سطح رطوبت 15، 20 و 25 درصد برحسب وزن مرطوب مطابق با سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) و براساس استاندارد میوه‌های خشک‌شده، فرآوری شدند. حد رطوبت

1 Maxwell
2 Homogeneous
3 Isotropic
4 Texture profile analysis
5 Heterogeneous
6 Hardness
7 Adhesiveness
8 Springiness
9 Elasticity
10 Cohesiveness
11 Gumminess
12 Chewiness
13 Resilience
14 Golden delicious
15 Proportional–integral–derivative

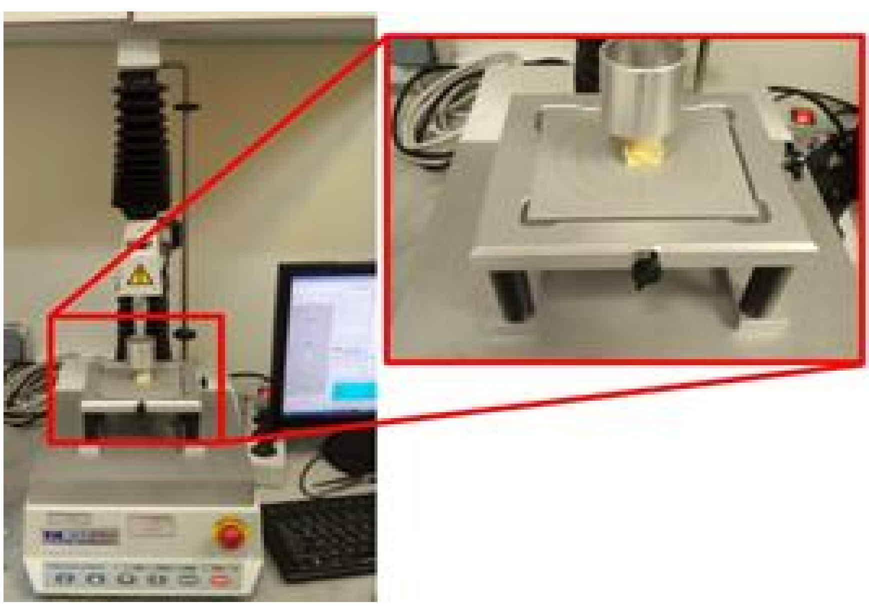
انتخاب‌شده کمی پایین‌تر (15 درصد) و کمی بالاتر (25 درصد) از میزان استاندارد (20 درصد) است تا تاثیر آن بر ارزیابی حسی نیز بررسی گردد.



شکل 1- سیستم خشک‌کن مادون‌قرمز و لوازم آن، (1) کامپیوتر (2) ترازو (3) سینی نمونه (4) تابش‌کننده سرامیکی مادون‌قرمز (5) کنترل‌کننده الکترونیکی (PLC) (6) محفظه خشک‌کن (7) دو ترموکوپل‌های نوع K برای ارزیابی دمای تابش‌دهنده‌ها و کنترل دمای سطحی محصول

بافت سنجی

مطابق Loredo و همکاران (2013)، آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت (TPA) با فشردن تا 50 درصد تغییر شکل با دستگاه بافت‌سنج انجام‌شد. بدین منظور از یک پروب سیلندری با قطر 20 میلی‌متر مطابق شکل 2 استفاده شد. دستگاه به‌نحوی برنامه‌ریزی شد که پروب از 10 میلی‌متری بالای سطح نمونه حرکت خود را آغاز نماید. برای پروب نیروی رهاساز برابر با 5 گرم و سرعت حرکت پیش از آزمون، حین آزمون و پس از آزمون به‌ترتیب برابر 1، 5 و 5 میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته‌شد.



شکل 2- آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت (TPA)

تجزیه و تحلیل پروفیل بافت

براساس Chong و همکاران (2008) از دو سیکل منحنی فشرده‌سازی مطابق شکل 3 پارامترهایی مانند حداکثر نیرو در سیکل اول (F_1)، حداکثر نیرو در سیکل دوم (F_2)، مساحت سطح زیر منحنی اول (A_1)، مساحت سطح زیر منحنی دوم (A_2)، مساحت سطح زیر منحنی اول در قسمت صعودی (A_3)، مساحت سطح زیر منحنی اول در قسمت نزولی (A_4)، مساحت منفی میان دو سیکل فشرده‌سازی (B)، مدت زمان لازم برای شروع حالت نزولی در منحنی اول از ابتدای مثبت محور عرضی (t_1)، مدت زمان لازم برای شروع حالت نزولی در منحنی دوم از ابتدای مثبت محور عرضی (t_2) برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی حسی استخراج‌شد. این شاخص‌ها شامل سختی (H) مطابق رابطه (1)، چسبندگی (Ad) مطابق رابطه (2)، فنریت (Sp) مطابق رابطه (3)، انسجام (Co) مطابق رابطه (4)، شاخص صمغی (G) مطابق رابطه (5)، قابلیت جویدن (CW) مطابق رابطه (6) و قابلیت ارتجاعی (Re) مطابق رابطه (7) است.

$$H= F_1 \quad (1)$$

$$Ad= B \quad (2)$$

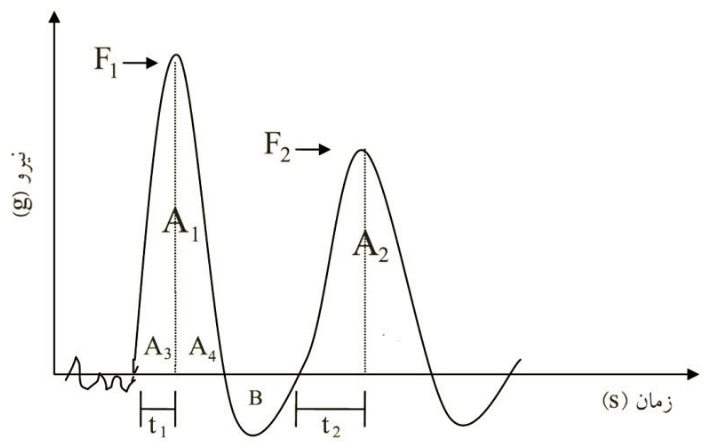
$$Sp= t_2/ t_1 \quad (3)$$

$$Co= A_2/ A_1 \quad (4)$$

$$G=H. Co \quad (5)$$

$$CW= H. Co. Sp \quad (6)$$

$$Re= A_4/ A_3 \quad (7)$$



شکل 3- شکل معمول نمودار نیرو-زمان برای آزمون تجزیه و تحلیل پروفیل بافت (TPA)

ارزیابی حسی

ارزیابی حسی بافت و پذیرش کلی محصول به روش هدونیک مطابق کار Kupongsak و Tan (2006) توسط 10 نفر ارزیاب آموزش‌دیده انجام شد. نمره‌دهی کیفیت مطابق Barrett و همکاران (2010) براساس اطلاعات جدول 1 با نمره‌دهی بین 1 تا 10 انجام‌شد. نمره 1 و 10 به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین مطلوبیت بود.

جدول 1- اطلاعات آموزش نحوه قضاوت حسی درباره برش‌های آب‌زدایی‌شده سیب برای ارزیاب‌ها

خاصیت حسی	ویژگی‌های عمومی مطلوب
بافت	احساس دهانی مطلوب از نظر بافت، عدم سختی بافت، عدم چروکیدگی
پذیرش کلی	مطلوبیت نهایی محصول از نظر مجموع خواص حسی شامل رنگ، بافت، عطر و طعم

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

برای بررسی آماری تاثیر سه فاکتور ضخامت (در سه سطح) و دما (در سه سطح) و درصد رطوبت (در سه سطح) روی هر یک از شاخص‌های بافتی آزمون پروفیل بافت و نمرات ارزیابی حسی؛ از طرح کاملاً تصادفی (CRD) در قالب فاکتوریل (3^3) استفاده شد. مقایسه میانگین به صورت آزمون دانکن با سطح اطمینان 95 درصد ($P<0/05$) انجام گرفت. آزمایشات پروفیل بافت و آزمون حسی به ترتیب در سه و ده تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS نسخه 19 انجام شد.

نتایج و بحث

سختی بافت

جدول 2 مقایسه میانگین و انحراف معیار شاخص سختی بافت برحسب گرم را برای برش‌های سیب در ضخامت‌های مختلف تحت تاثیر فاکتورهای مورد آزمون نشان‌می‌دهد. جدول 3 تجزیه واریانس را برای این مقایسه نشان می‌دهد. شاخص سختی برش‌های سیب با افزایش دمای سطحی طی پرتودهی همواره به‌طور معنی‌داری زیاد شد. همچنین با افزایش ضخامت یا کاهش درصد رطوبت برش‌های سیب نیز شاخص سختی بافت زیاد شد. میزان سختی برای برش‌های سیب خام (شاهد) در ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر به‌ترتیب 120/467 ±4272/790، 99/513 ±5428/437 و 132/402 ±6145/988 برحسب گرم بود. همان‌طورکه مشخص است، طی خشک‌کردن مادون‌قرمز تا سطوح رطوبتی مورد آزمون؛ نرم شدگی مشاهده شده‌است. در واقع، با کاهش رطوبت در برش سیب و شکل‌گیری فضاهای متخلخل سختی محصول نسبت به برش‌های خام کاهش یافت و در دماهای بالا به دلیل خروج سریع‌تر رطوبت بافت محصول سخت‌تر مشاهده شد. در ضخامت زیاد می‌تواند کاهش اثر منافذ متخلخل به دلیل ماده جامد بیشتر محصول عامل زیاد شدن سختی بافت باشد.

جدول 2- مقایسه میانگین سختی بافت (گرم) برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مختلف

ضخامت	دما	رطوبت (٪)		
(mm)	(°C)	15	20	25
5	70	1043/343±28/252$^{Cc\alpha}$	968/816±8/974$^{Cc\beta}$	695/177±7/685$^{Cc\gamma}$
	75	1236/886±36/632$^{Bc\alpha}$	1140/889±28/246$^{Bc\beta}$	734/024±23/106$^{Bc\gamma}$
	80	1364/948±51/286$^{Ac\alpha}$	1216/372±25/578$^{Ac\beta}$	783/881±8/691$^{Ac\gamma}$
9	70	1242/727±12/209$^{Cb\alpha}$	1075/08±11/192$^{Cb\beta}$	845/444±24/524$^{Cb\gamma}$
	75	1338/054±44/725$^{Bb\alpha}$	1166/455±14/477$^{Bb\beta}$	848/542±22/637$^{Bb\gamma}$
	80	1451/284±21/561$^{Ab\alpha}$	1157/81±19/252$^{Ab\beta}$	960/929±24/587$^{Ab\gamma}$
13	70	1338/425±36/954$^{Ca\alpha}$	1257/77±25/270$^{Ca\beta}$	922/886±18/686$^{Ca\gamma}$
	75	1466/305±29/231$^{Ba\alpha}$	1337/078±20/670$^{Ba\beta}$	950/151±42/304$^{Ba\gamma}$
	80	1497/476±10/964$^{Aa\alpha}$	1347/878±43/692$^{Aa\beta}$	961/083±23/634$^{Aa\gamma}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد ($P<0/05$)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 3- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی سختی بافت برش‌های سیب ($P<0/05$)

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	$1/066\times10^8$	27	3949173/898	5325/368	0/000
دما	309830/108	2	154915/054	208/899	0/000
ضخامت	598780/851	2	299390/425	403/721	0/000
رطوبت	3201373/225	2	1600686/612	2158/488	0/000
دما× ضخامت	40000/668	4	10000/167	13/485	0/000
دما× رطوبت	62403/471	4	15600/868	21/037	0/000
ضخامت× رطوبت	50634/862	4	12658/715	17/070	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	19626/969	8	2453/371	3/308	0/004
خطا	40045/191	54	741/578		
کل	$1/067\times10^8$	81			

در همین راستا، Martynenko و Janaszek (2014) گزارش کردند که سختی بافت طی خشک‌کردن برش‌های سیب کاهش‌یافت. اگرچه آن‌ها بر خلاف پژوهش حاضر برای برش‌های فرآوری‌شده در دمای بالاتر سختی کمتری مشاهده‌کردند اما نتایج تحقیق حاضر با نتایج بسیاری از پژوهشگران دیگر سازگاری دارد. Kotwaliwale و همکاران (2007) افزایش سختی را ناشی از خروج رطوبت بیشتر

بیان‌کردند. آن‌ها سختی بیشتر نمونه‌های خشک‌شده در دمای بالاتر را ناشی از خروج سریع رطوبت دانستند که موجب فروپاشی حفرات موئینگی[1] درون محصول می‌گردد. Acevedo و همکاران (2008) بیان‌کردند که بروز چروکیدگی بیشتر موجب متراکم‌تر شدن نمونه‌ها شد و در نتیجه نیروی شکست بیشتری برای نمونه‌ها انتظار می‌رود. همچنین آن‌ها بیان‌کردند که با افزایش محتوی رطوبت (به معنی رطوبت نسبی یا RH بیشتر) آب روی دیواره سلولی خاصیت پلاستیک‌کنندگی دارد و بنابراین برش میوه نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر شد و سختی آن کمتر بود. Chong و همکاران (2014) افزایش در سختی را ناشی از انتقال جرم سریع و آسیب‌دیدگی غشاء و ساختار سلولی دانستند. آن‌ها عامل دیگر سختی را سطح رطوبت نهایی پایین در محصول دانستند و بیان‌کردند که مدت زمان کوتاه‌تر برای دستیابی به سطح رطوبتی پایین (دمای بالاتر فرآوری) موجب سختی بیشتر خواهد شد. Cuccurullo و همکاران (2012) نیز سختی سیب را مرتبط با قدرت پیوندهای داخلی محصول دانستند اما میان دماها و روش‌های مختلف خشک‌کردن اختلاف معنی‌داری مشاهده‌نکردند.

چسبندگی بافت

جدول 4 مقایسه میانگین و انحراف معیار شاخص چسبندگی بافت برحسب گرم در ثانیه را برای تیمارهای مختلف مورد آزمون نشان‌می‌دهد.

جدول 4- مقایسه میانگین چسبندگی بافت (گرم در ثانیه) برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مختلف

ضخامت (mm)	دما (°C)	رطوبت (٪) 15	20	25
5	70	-0/829±0/078 Acγ	-1/275±0/208 Acβ	-2/317±0/151 Acα
	75	-0/810±0/096 ABcγ	-1/243±0/153 ABcβ	-2/277±0/122 ABcα
	80	-0/794±0/133 Bcγ	-1/177±0/163 Bcβ	-2/262±0/241 Bcα
9	70	-3/508±0/253 Abγ	-4/497±0/341 Abβ	-5/670±0/189 Abα
	75	-3/424±0/376 ABbγ	-4/343±0/179 ABbβ	-5/614±0/344 ABbα
	80	-3/283±0/264 Bbγ	-4/099±0/107 Bbβ	-5/328±0/170 Bbα
13	70	-5/440±0/264 Aaγ	-6/618±0/024 Aaβ	-8/035±0/303 Aaα
	75	-5/400±0/196 ABaγ	-6/539±0/154 ABaβ	-7/831±0/191 ABaα
	80	-5/245±0/138 Baγ	-6/535±0/190 Baβ	-7/819±0/287 Baα

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد (P<0/05)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 5- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی چسبندگی بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	1822/824	27	67/512	1465/856	0/000
دما	0/455	2	0/228	4/941	0/011
ضخامت	362/817	2	181/409	3938/840	0/000
رطوبت	57/128	2	28/564	620/192	0/000
دما× ضخامت	0/178	4	0/045	0/967	0/433
دما× رطوبت	0/009	4	0/002	0/050	0/995
ضخامت× رطوبت	2/770	4	0/693	15/038	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	0/066	8	0/008	0/179	0/993
خطا	2/487	54	0/046		
کل	1825/311	81			

1 Capillary voids

در جدول 5 تجزیه واریانس مشخص است. با افزایش سطح رطوبت برش‌های سیب نیروی منفی چسبندگی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که عامل آن نرمی بیشتر محصول و تعامل رطوبت با سطح می‌تواند باشد. همچنین با افزایش ضخامت نیز روند افزایشی معنی‌دار در چسبندگی مشاهده شد که می‌تواند ناشی از نیروی وزن بیشتر برش‌ها هم باشد. با افزایش دمای سطحی طی پرتودهی نیز نیروی چسبندگی به‌طور معنی‌دار کاهش نشان‌داد که به دلیل سختی بیشتر برش‌ها می‌تواند باشد. مقدار نیروی چسبندگی برای برش‌های خام با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متری به‌ترتیب برابر 103/298±3/119-، 86/304±5/207- و 63/543±2/885- برحسب گرم در ثانیه بود. طی پرتودهی تغییرات نیروی چسبندگی در برش‌های ضخیم کمتر بود. Martynenko و Janaszek (2014) بیان‌کردند که چسبندگی با کاهش محتوی رطوبت و آب آزاد در سطح نمونه و در نتیجه کاهش تعامل آن با محتوی قند نمونه، کاسته شد. Nishinari و همکاران (2013) چسبندگی را به اجزای ویسکوز و رفتار خیس‌کنندگی محصول نیز مرتبط دانستند.

فنریت بافت

جدول 6 مقایسه میانگین و انحراف معیار شاخص فنریت بافت برش‌های سیب تحت تیمارهای مختلف مورد آزمون را نشان می‌دهد. تجزیه واریانس در جدول 7 مشخص است و اختلاف میان سطوح فاکتورهای مورد آزمون شامل ضخامت برش، دمای سطحی و رطوبت نمونه‌ها از نظر شاخص فنریت بافت معنی‌دار بود.

جدول 6- مقایسه میانگین شاخص فنریت بافت برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون

ضخامت (mm)	دما (°C)	رطوبت (٪) 15	20	25
5	70	0/720±0/014$^{Ca\alpha}$	0/696±0/034$^{Ca\beta}$	0/679±0/010$^{Ca\gamma}$
	75	0/802±0/023$^{Ba\alpha}$	0/730±0/029$^{Ba\beta}$	0/720±0/024$^{Ba\gamma}$
	80	0/728±0/015$^{Aa\alpha}$	0/693±0/010$^{Aa\beta}$	0/673±0/035$^{Aa\gamma}$
9	70	0/614±0/032$^{Cb\alpha}$	0/561±0/013$^{Cb\beta}$	0/468±0/037$^{Cb\gamma}$
	75	0/575±0/018$^{Bb\alpha}$	0/538±0/021$^{Bb\beta}$	0/503±0/006$^{Bb\gamma}$
	80	0/723±0/018$^{Ab\alpha}$	0/671±0/013$^{Ab\beta}$	0/571±0/011$^{Ab\gamma}$
13	70	0/549±0/017$^{Cc\alpha}$	0/524±0/011$^{Cc\beta}$	0/523±0/012$^{Cc\gamma}$
	75	0/556±0/022$^{Bc\alpha}$	0/543±0/018$^{Bc\beta}$	0/533±0/046$^{Bc\gamma}$
	80	0/538±0/002$^{Ac\alpha}$	0/528±0/014$^{Ac\beta}$	0/520±0/020$^{Ac\gamma}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد (P<0/05)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 7- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی فنریت بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	30/892	27	1/144	2294/010	0/000
دما	0/016	2	0/008	15/993	0/000
ضخامت	0/476	2	0/238	477/392	0/000
رطوبت	0/060	2	0/030	59/977	0/000
دما× ضخامت	0/077	4	0/019	38/548	0/000
دما× رطوبت	0/001	4	0/000	0/740	0/569
ضخامت× رطوبت	0/028	4	0/007	14/141	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	0/009	8	0/001	2/154	0/046
خطا	0/027	54	0/000		
کل	30/919	81			

شاخص فنریت بافت برای برش‌های سیب خام با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر به‌ترتیب 0/030±0/645، 0/019±0/551 و 0/028±0/434 بود. شاخص فنریت بافت با افزایش ضخامت کاهش‌یافت. با افزایش دمای سطحی طی پرتودهی شاخص فنریت بافت بیشتر شد. با افزایش سطح رطوبت برش‌های سیب نیز شاخص فنریت بافت کاهش نشان‌داد. فنریت بافت برش‌های سیب تحت تاثیر مستقیم الاستیسیته می‌تواند باشد. با افزایش ضخامت یا کاهش دمای پرتودهی یا افزایش سطح رطوبت برگشت‌پذیری بافت محصول کاهش می‌یابد. Martynenko و Janaszek (2014) نتایج مشابهی را گزارش‌کردند. آن‌ها کاهش شاخص فنریت را به پدیده انتقال شیشه‌ای و تغییر از رفتار الاستیک به پلاستیک مرتبط دانستند. Chung و همکاران (2014) بیان‌کردند که روش‌های مختلف خشک‌کردن میزان شاخص فنریت بافت تقریباً مشابهی را نشان‌می‌دهند.

انسجام بافت

جدول 8 مقایسه میانگین و انحراف معیار انسجام بافت در برش‌های سیب تحت تیمارهای مختلف مورد آزمون را نشان می‌دهد. تجزیه واریانس در جدول 9 نشان داده شده است.

جدول 8– مقایسه میانگین شاخص انسجام بافت برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون

ضخامت (mm)	دما (°C)	رطوبت (%) 15	20	25
5	70	0/625±0/018$^{Aa\gamma}$	0/629±0/015$^{Aa\beta}$	0/633±0/025$^{Aa\alpha}$
	75	0/632±0/029$^{Aa\gamma}$	0/651±0/015$^{Aa\beta}$	0/664±0/008$^{Aa\alpha}$
	80	0/536±0/020$^{Ba\gamma}$	0/570±0/019$^{Ba\beta}$	0/616±0/010$^{Ba\alpha}$
9	70	0/581±0/007$^{Ab\gamma}$	0/628±0/013$^{Ab\beta}$	0/637±0/005$^{Ab\alpha}$
	75	0/442±0/021$^{Ab\gamma}$	0/568±0/021$^{Ab\beta}$	0/587±0/022$^{Ab\alpha}$
	80	0/523±0/010$^{Bb\gamma}$	0/563±0/017$^{Bb\beta}$	0/577±0/016$^{Bb\alpha}$
13	70	0/448±0/011$^{Ac\gamma}$	0/512±0/017$^{Ac\beta}$	0/547±0/017$^{Ac\alpha}$
	75	0/541±0/020$^{Ac\gamma}$	0/542±0/013$^{Ac\beta}$	0/545±0/008$^{Ac\alpha}$
	80	0/463±0/018$^{Bc\gamma}$	0/526±0/004$^{Bc\beta}$	0/539±0/009$^{Bc\alpha}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد ($P<0/05$)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 9- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی انسجام بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	26/430	27	0/979	3487/785	0/000
دما	0/020	2	0/010	35/157	0/000
ضخامت	0/133	2	0/066	236/768	0/000
رطوبت	0/046	2	0/023	82/504	0/000
دما× ضخامت	0/049	4	0/012	43/653	0/000
دما× رطوبت	0/002	4	0/001	1/827	0/137
ضخامت× رطوبت	0/014	4	0/004	12/494	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	0/022	8	0/003	9/800	0/000
خطا	0/015	54	0/000		
کل	26/445	81			

به‌طور کلی با افزایش ضخامت برش‌های سیب انسجام بافت به‌طور معنی‌داری کاسته شد. دمای سطحی 80 درجه سانتی‌گراد کمترین انسجام بافت را نشان‌داد و دماهای 70 و 75 درجه سانتی‌گراد از این نظر با یکدیگر اختلاف معنی‌دار نداشتند. با کاهش سطح رطوبت برش‌های سیب نیز انسجام بافت به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافت. انسجام بافت در برش‌های خام با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر به‌ترتیب برابر

0/066±0/005، 0/057±0/004 و 0/042±0/003 بود. انسجام بافت برش‌های میوه با نسبت رطوبت به ماده جامد محصول به‌طور مستقیم مرتبط است. ضخامت بیشتر محصول با داشتن سختی بیشتر؛ انسجام کمتری را نشان می‌دهد. Martynenko و Janaszek (2014) پایین بودن انسجام بافت را در نمونه خام ناشی از باقی‌مانده تغییر شکل سطح نمونه در نقطه تماس دانستند. آن‌ها بیان‌کردند که حین نرم شدن در اثر فرآوری انسجام بافت افزایش‌می‌یابد و سخت‌شدگی (رطوبت کمتر) باعث کاهش انسجام بافت می‌گردد. این پژوهشگران کم بودن انسجام بافت در فرآوری در دمای بالا را ناشی از ساختار شکننده نمونه‌ها در بارگذاری بیشتر دانستند.

شاخص صمغی بافت

جدول 10 مقایسه میانگین و انحراف معیار شاخص صمغی بافت را برای برش‌های سیب در فاکتورهای مورد مطالعه نشان‌می‌دهد. جدول 11 تجزیه واریانس را مشخص می‌کند.

جدول 10- مقایسه میانگین شاخص صمغی بافت برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون

ضخامت	دما	رطوبت (٪)		
(mm)	(°C)	15	20	25
5	70	653/146±33/547$^{Ba\alpha}$	609/384±9/597$^{Ba\beta}$	440/417±22/294$^{Ba\gamma}$
	75	782/42±37/457$^{Aa\alpha}$	744/147±36/181$^{Aa\beta}$	487/765±16/805$^{Aa\gamma}$
	80	778/24±31/9$^{Aa\alpha}$	652/622±35/373$^{Aa\beta}$	483/353±6/143$^{Aa\gamma}$
9	70	722/348±16/113$^{Ba\alpha}$	675/38±12/895$^{Ba\beta}$	538/724±12/225$^{Ba\gamma}$
	75	590/861±9/992$^{Aa\alpha}$	662/807±17/743$^{Aa\beta}$	498/524±8/058$^{Aa\gamma}$
	80	760/163±18/585$^{Aa\alpha}$	652/921±30/893$^{Aa\beta}$	555/189±13/364$^{Aa\gamma}$
13	70	600/01±1/674$^{Ba\alpha}$	644/208±10/94$^{Ba\beta}$	505/708±23/376$^{Ba\gamma}$
	75	794/302±37/328$^{Aa\alpha}$	726/146±29/123$^{Aa\beta}$	517/791±14/475$^{Aa\gamma}$
	80	693/439±24/167$^{Aa\alpha}$	710/128±23/836$^{Aa\beta}$	518/218±4/111$^{Aa\gamma}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد ($P<0/05$)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 11- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی شاخص صمغی بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	32967654/171	27	1221024/229	2381/819	0/000
دما	38307/666	2	19153/833	37/363	0/000
ضخامت	1068/230	2	534/115	1/042	0/360
رطوبت	642403/727	2	321201/863	626/560	0/000
دما× ضخامت	81523/977	4	20380/994	39/757	0/000
دما× رطوبت	21033/458	4	5258/365	10/257	0/000
ضخامت× رطوبت	32865/885	4	8216/471	16/028	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	45535/247	8	5691/906	11/103	0/000
خطا	27682/752	54	512/644		
کل	32995336/923	81			

دمای 70 درجه سانتی‌گراد شاخص صمغی کمتری را نشان‌داد و از این نظر با دو دمای 75 و 80 درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌دار داشت. شاخص صمغی بافت با افزایش سطح رطوبت همواره به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافت که نشان‌دهنده سختی کمتر و کاهش سفتی است (جدول 2). میان ضخامت‌های مختلف مورد آزمون از نظر شاخص صمغی بافت اختلاف معنی‌دار مشاهده‌نشد که احتمالاً دلیل آن تردی یکسان ضخامت‌های مختلف می‌باشد. شاخص صمغی بافت برای برش‌های خام سیب با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر بهترتیب برابر 41/245

±281/803، 75/829± 355/519 و 72/432± 414/498 بود. شاخص صمغی بافت خام کمتر از شاخص صمغی برش‌های آبزدایی‌شده است که این امر نشان‌دهنده ایجاد تردی در بافت طی فرآوری است. در واقع، Bourles و همکاران (2009) شاخص صمغی را به‌عنوان انرژی مورد نیاز برای آماده‌سازی غذا جهت بلع تعریف کردند و مقدار کم آن را به معنی نرمی و مقدار بیشتر آن را به معنی سفتی یا تردی با ایجاد حالت شکستگی سلولی دانستند. Cuccurullo و همکاران (2012) با افزایش دمای فرآیند تغییرات معنی‌داری در شاخص صمغی سیب مشاهده‌نکردند.

قابلیت جویدن بافت

جدول 12 مقایسه میانگین و انحراف معیار قابلیت جویدن بافت برش‌های سیب را تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون نشان می‌دهد. جدول 13 تجزیه واریانس را نشان می‌دهد.

جدول 12- مقایسه میانگین قابلیت جویدن بافت برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون

ضخامت (mm)	دما (°C)	رطوبت (٪) 15	20	25
5	70	$470/572 \pm 32/726^{Ba\alpha}$	$414/007 \pm 13/069^{Ba\beta}$	$307/018 \pm 25/329^{Ba\gamma}$
	75	$627/939 \pm 40/156^{Aa\alpha}$	$543/676 \pm 35/645^{Aa\beta}$	$351/584 \pm 21/755^{Aa\gamma}$
	80	$567/138 \pm 35/185^{Aa\alpha}$	$452/396 \pm 22/868^{Aa\beta}$	$325/489 \pm 13/362^{Aa\gamma}$
9	70	$443/955 \pm 15/892^{Bb\alpha}$	$379/527 \pm 16/553^{Bb\beta}$	$252/661 \pm 22/628^{Bb\gamma}$
	75	$340/129 \pm 14/865^{Bb\alpha}$	$357/143 \pm 21/725^{Ab\beta}$	$250/933 \pm 7/083^{Ab\gamma}$
	80	$549/582 \pm 6/773^{Bb\alpha}$	$438/338 \pm 13/610^{Ab\beta}$	$317/147 \pm 2/387^{Ab\gamma}$
13	70	$329/971 \pm 11/579^{Ac\alpha}$	$338/087 \pm 11/897^{Ac\beta}$	$264/869 \pm 12/197^{Ac\gamma}$
	75	$441/321 \pm 3/879^{Bc\alpha}$	$394/614 \pm 22/099^{Bc\beta}$	$275/987 \pm 18/491^{Bc\gamma}$
	80	$373/623 \pm 14/452^{Bc\alpha}$	$375/324 \pm 12/826^{Bc\beta}$	$269/522 \pm 10/723^{Bc\gamma}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد ($P<0/05$)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 13- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی قابلیت جویدن بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	12935679/590	27	479099/244	1180/670	0/000
دما	41401/580	2	20700/790	51/014	0/000
ضخامت	177478/964	2	88739/482	218/685	0/000
رطوبت	411475/039	2	205733/520	507/010	0/000
دما× ضخامت	95085/246	4	23771/312	58/581	0/000
دما× رطوبت	9155/891	4	2288/973	5/641	0/001
ضخامت× رطوبت	30838/368	4	7709/592	18/999	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	30705/323	8	3838/165	9/459	0/000
خطا	21912/442	54	405/786		
کل	12957592/032	81			

قابلیت جویدن با افزایش ضخامت برش‌های سیب به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافت. در واقع، با افزایش ضخامت برش‌ها، انسجام و فنریت کاسته شد و در نتیجه قابلیت جویدن به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافت. نمونه‌های فرآوری‌شده در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قابلیت جویدن کمتری نشان‌دادند و از این نظر با دو دمای 75 و 80 درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌دار بود. با افزایش سطح رطوبت در برش‌های سیب قابلیت جویدن همواره به‌طور معنی‌داری کم شد. شاخص قابلیت جویدن بافت برای برش‌های خام سیب با ضخامت 5،

9 و 13 میلی‌متر به‌ترتیب برابر 10/106± 168/453، 7/138± 187/905 و 6/934± 208/385 بود. همان‌طورکه مشخص است فرآوری موجب افزایش قابلیت جویدن شده‌است. در همین راستا، Martynenko و Janaszek (2014) بیان‌کردند که افزایش شاخص قابلیت جویدن بافت نشان‌دهنده نیاز به انرژی بیشتر برای جویدن میوه خشک‌شده است؛ زیرا با سختی و قابلیت فنریت بافت رابطه مستقیم دارد. Chong و همکاران (2008) نیز قابلیت جویدن محصول خشک‌شده را بالاتر از محصول تازه مشاهده‌کردند.

قابلیت ارتجاعی بافت

جدول 14 مقایسه میانگین و انحراف معیار قابلیت ارتجاعی بافت را برای فاکتورهای مورد مطالعه نشان‌می‌دهد. میان سطوح مختلف دما، ضخامت و رطوبت همواره اختلاف معنی‌دار مشاهده‌شد. جدول 15 نشان‌دهنده تجزیه واریانس است. قابلیت ارتجاعی با افزایش ضخامت برش‌ها زیاد شد؛ با افزایش دمای سطحی طی پرتودهی افزایش‌یافت و در نهایت با افزایش سطح رطوبت در نمونه‌ها کاهش نشان‌داد. شاخص قابلیت ارتجاعی بافت برای برش‌های خام سیب با ضخامت 5، 9 و 13 میلی‌متر به‌ترتیب برابر 0/002± 0/027، 0/001± 0/036 و 0/004± 0/042 بود. Martynenko و Janaszek (2014) نیز افزاش قابلیت ارتجاعی را با کاهش رطوبت مشاهده نمودند. آنها در مجموع گزارش‌کردند که طی خشک‌کردن بافت برش‌های سیب از رفتار ویسکوالاستیک به الاستیک و سپس از الاستیک به پلاستیک یا شیشه‌ای ممکن است تغییر نماید. این تغییرات به زمان، دما و محتوی رطوبت ارتباط دارند. آن‌ها سختی اولیه بالا به همراه انسجام، فنریت و قابلیت ارتجاعی پایین در سیب خام را شاهدی بر وضعیت ویسکوالاستیک دانستند.

جدول 14- مقایسه میانگین قابلیت ارتجاعی بافت برش سیب تحت تاثیر تیمارهای مورد آزمون

ضخامت	دما	رطوبت (٪)		
(mm)	(°C)	15	20	25
5	70	0/281±0/012$^{Cc\alpha}$	0/189±0/011$^{Cc\beta}$	0/148±0/014$^{Cc\gamma}$
	75	0/302±0/007$^{Bc\alpha}$	0/190±0/017$^{Bc\beta}$	0/155±0/016$^{Bc\gamma}$
	80	0/319±0/015$^{Ac\alpha}$	0/239±0/023$^{Ac\beta}$	0/206±0/012$^{Ac\gamma}$
9	70	0/338±0/011$^{Cb\alpha}$	0/276±0/009$^{Cb\beta}$	0/228±0/013$^{Cb\gamma}$
	75	0/394±0/022$^{Bb\alpha}$	0/290±0/010$^{Bb\beta}$	0/230±0/013$^{Bb\gamma}$
	80	0/397±0/017$^{Ab\alpha}$	0/305±0/008$^{Ab\beta}$	0/245±0/028$^{Ab\gamma}$
13	70	0/399±0/014$^{Ca\alpha}$	0/349±0/003$^{Ca\beta}$	0/253±0/018$^{Ca\gamma}$
	75	0/416±0/012$^{Ba\alpha}$	0/358±0/015$^{Ba\beta}$	0/231±0/014$^{Ba\gamma}$
	80	0/430±0/011$^{Aa\alpha}$	0/367±0/016$^{Aa\beta}$	0/244±0/008$^{Aa\gamma}$

* حروف لاتین بزرگ مقایسه بین دماهای آزمون و حروف لاتین کوچک مقایسه بین ضخامت برش‌ها است؛ حروف یونانی مقایسه بین درصد رطوبت را نشان‌می‌دهد (P<0/05)؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

جدول 15- تجزیه واریانس برای تاثیر فاکتورهای مورد آزمون روی قابلیت ارتجاعی بافت برش‌های سیب

	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
مدل	7/272	27	0/269	1058/718	0/000
دما	0/013	2	0/007	26/465	0/000
ضخامت	0/174	2	0/087	342/962	0/000
رطوبت	0/294	2	0/147	577/223	0/000
دما× ضخامت	0/004	4	0/001	4/014	0/006
دما× رطوبت	0/004	4	0/001	3/490	0/013
ضخامت× رطوبت	0/016	4	0/004	15/790	0/000
دما× ضخامت× رطوبت	0/002	8	0/000	0/919	0/508
خطا	0/014	54	0/000		
کل	7/285	81			

ارزیابی حسی

جدول 16 جزئیات مقایسه سطوح مختلف دما، رطوبت و ضخامت برش‌های سیب را از نظر نمرات ارزیابی حسی بافت و پذیرش کلی نشان‌می‌دهد. همان‌طورکه مشخص است، به‌طورکلی دمای 70°C، رطوبت 25 درصد بر حسب وزن مرطوب و ضخامت 5 میلی‌متر، در ارزیابی نمرات بالاتری را کسب کردند که هر سه شرایط سختی کمتری را در محصول موجب شدند (جدول 2). ضخامت برش 5 میلی‌متر به‌دلیل چروکیدگی کمتر مطلوبیت بافت و پذیرش کلی بالاتری نشان‌داد. در همین راستا، Nowak و Lewicki (2005) مشاهده‌کردند که شدت زیاد تبخیر آب (دمای بالا یا ضخامت زیاد یا سطح رطوبت نهایی پایین) می‌تواند تنش چروکیدگی بیشتری در محصول ایجاد کند و در نتیجه محصول پذیرش کیفی کمتری خواهد داشت. براساس پژوهش Zhu و همکاران (2010) ضخامت برش اثر معنی‌داری روی مطلوبیت خصوصیات حسی محصول داشت و طی پرتودهی متناوب تغییر رنگ نامطلوب سطحی شدید مشاهده‌نشد. Chong و همکاران (2008) بیان‌کردند که سختی پارامتر مهمی طی خشک‌کردن است و جهت بررسی سختی سطحی[2] در میوه‌های خشک‌شده به‌کار می‌رود و میوه خشک‌شده نرم‌تر نشان‌دهنده کیفیت بالاتر است.

جدول 16- مقایسه میانگین نمرات ارزیابی حسی براساس سطوح مختلف فاکتورهای دما، رطوبت و ضخامت

فاکتور	سطح	بافت	پذیرش
	70	8/18±0/787A	8/1±0/637A
دما (°C)	75	6/62±0/943B	6/76±0/783B
	80	5/49±1/104C	5/78±0/909C
(sig.)		0/000	0/000
	15	6/52±1/4C	6/68±1/253B
رطوبت (%)	20	6/78±1/482B	6/91±1/233A
	25	6/99±1/465A	7/04±1/198A
(sig.)		0/000	0/000
ضخامت (mm)	5	7/44±1/191A	7/39±0/944A
	9	6/82±1/259B	6/84±1/151B
	13	6/02±1/543C	6/4±1/372C
(sig.)		0/000	0/000

* حروف انگلیسی مقایسه بین سطوح هر فاکتور را نشان‌می‌دهد (P<0/05). * حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است، (M±SD).

بر این اساس، در این پژوهش کیفیت مطلوب بافت از نظر سختی در دمای کمتر، ضخامت کمتر و رطوبت بیشتر یا شرایط شدت کم تبخیر مشاهده‌شد. سختی بافت برش سیب در این شرایط برابر با 7/685 ±695/177 گرم بود. سایر پارامترهای بافتی دستگاهی محاسبه‌شده نیز می‌تواند جهت تعیین بافت مطلوب به‌کار گرفته شود و تغییرات پارامترهای پروفیل بافت برای دستیابی به بافت مطلوب از نظر هر تیمار در این تحقیق قابل ارزیابی است. بر این اساس، ارتباط شاخص‌های تجزیه و تحلیل پروفیل بافت برش‌های سیب با افزایش دما یا افزایش ضخامت یا افزایش رطوبت به‌صورت جدول 17 تغییر نمود. پارامترهای بافت سیب خام تحت تاثیر حرارت به‌صورت جدول به 18 تغییر کرد. در واقع حرارت‌دهی سیب خام باعث کاهش کاهش در سختی و چسبندگی و افزایش در فنریت، انسجام، شاخص صمغی، قابلیت جویدن و قابلیت ارتجاعی گردید.

جدول 17- تغییرات نمادین شاخص‌های پروفیل بافتی برش‌های سیب با افزایش (↑) تیمارها

تیمار	سختی	چسبندگی	فنریت	انسجام	شاخص صمغی	قابلیت جویدن	قابلیت ارتجاعی
↑دما	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑
↑ضخامت	↑	↑	↓	↓	↑↓	↓	↑
↑رطوبت	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓

*شرایط مطلوب ارزیابی حسی بافت: دمای کمتر، ضخامت کمتر، رطوبت بیشتر

2 Case-hardening

جدول 18- تغییرات نمادین شاخص‌های پروفیل بافتی برش‌های سیب خام با افزایش (↑) حرارت‌دهی

تیمار	سختی	چسبندگی	فنریت	انسجام	شاخص صمغی	قابلیت جویدن	قابلیت ارتجاعی
↑حرارت‌دهی طی خشک‌کردن	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑

نتیجه‌گیری

این پژوهش مزایای سنجش و تجزیه و تحلیل پروفیل بافتی برای برش‌های سیب را طی خشک‌کردن و آب‌زدایی مادون قرمز نشان داد. آزمون پروفیل بافتی تحت تاثیر حرارت‌دهی طی خشک‌کردن، دما، ضخامت و محتوی رطوبت می‌تواند انواع رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک طی نرم شدن، الاستیک با سخت‌شدن، پلاستیک و شیشه‌ای در پایان خشک‌کردن را مشخص نماید. نتایج حاصل از آزمون پروفیل بافت می‌تواند در تعیین کمی مطلوبیت بافت با توجه به هم‌بستگی آن‌ها با داده‌های ارزیابی حسی مفید باشد. شدت زیاد تبخیر آب (در شرایط: دمای بالا یا ضخامت زیاد یا سطح رطوبت نهایی پایین) طی خشک‌کردن می‌تواند موجب بروز تنش چروکیدگی بیشتری در بافت سیب گردد و در نتیجه محصول دارای پذیرش کیفی کمتری خواهد بود. در واقع دمای 70°C، رطوبت 25 درصد بر حسب وزن مرطوب و ضخامت 5 میلی‌متر تیمارهای مطلوب از نظر ارزیابی حسی بودند و مقدار شاخص‌های دستگاهی آزمون پروفیل بافت برای آن‌ها در این پژوهش مشخص گردید.

منابع

Acevedo, N. C., Briones, V., Buera, P., & Aguilera, J. M. (2008). Microstructure affects the rate of chemical, physical and color changes during storage of dried apple discs. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 222-231.

Barrett, D. M., Beaulieu, J. C., & Shewfelt, R. (2010). Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 369-389.

Bourles, E., Mehinagic, E., Courthaudon, J., & Jourjon, F. (2009). Impact of vacuum cooking process on the texture degradation of selected apple cultivars. *Journal of Food Science*, 74(9).

Chong, C. H., Figiel, A., Law, C. L., & Wojdyło, A. (2014). Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 975-989.

Chong, C. H., Law, C. L., Cloke, M., Abdullah, L. C., & Daud, W. R. W. (2008). Drying kinetics, texture, color, and determination of effective diffusivities during sun drying of Chempedak. *Drying Technology*, 26(10), 1286-1293.

Cuccurullo, G., Giordano, L., Albanese, D., Cinquanta, L., & Di Matteo, M. (2012). Infrared thermography assisted control for apples microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 112(4), 319-325.

Falade, K., & Aworh, O. (2004). Adsorption isotherms of osmo-oven dried African star apple (*Chrysophyllum albidum*) and African mango (*Irvingia gabonensis*) slices. *European Food Research and Technology*, 218(3), 278-283.

Food and Agriculture Organization, Dried fruit, in: www.fao.org/3/a-au111e.pdf or http://www.fao.org/3/V5030E/V5030E0j.html

Funebo, T., Ahrné, L. l. a., Kidman, S., Langton, M., & Skjöldebrand, C. (2000). Microwave heat treatment of apple before air dehydration–effects on physical properties and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 46(3), 173-182.

Khin, M. M., Zhou, W., & Yeo, S. Y. (2007). Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties. *Journal of food Engineering*, 81(3), 514-522.

Kotwaliwale, N., Bakane, P., & Verma, A. (2007). Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1207-1211.

Krokida, M. K., Karathanos, V. T., & Maroulis, Z. B. (2000). Compression analysis of dehydrated agricultural products. *Drying technology*, 18(1-2), 395-408.

Kupongsak, S., & Tan, J. (2006). Application of fuzzy set and neural network techniques in determining food process control set points. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9), 1169-1178.

Liu, Y., Zhu, W., Luo, L., Li, X., & Yu, H. (2014). A mathematical model for vacuum far-infrared drying of potato slices. *Drying Technology*, 32(2), 180-189.

López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 772-777.

Loredo, A. B. G., Guerrero, S. N., Gomez, P. L., & Alzamora, S. M. (2013). Relationships between rheological properties, texture and structure of apple (*Granny Smith* var.) affected by blanching and/or osmotic dehydration. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 475-488.

Maity, T., Raju, P., & Bawa, A. (2012). Effect of freezing on textural kinetics in snacks during frying. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 155-165.

Martynenko, A., & Janaszek, M. A. (2014). Texture changes during drying of apple slices. *Drying Technology*, 32(5), 567-577.

Mayor, L., & Sereno, A. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373-386.

Nishinari, K., Kohyama, K., Kumagai, H., Funami, T., & Bourne, M. C. (2013). Parameters of texture profile analysis. *Food Science and Technology Research*, 19(3), 519-521.

Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2005). Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology*, 23(4), 831-846.

Perrot, N., Ioannou, I., Allais, I., Curt, C., Hossenlopp, J., & Trystram, G. (2006). Fuzzy concepts applied to food product quality control: A review. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9), 1145-1154.

Toğrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 610-619.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51-59.

Velickova, E., Winkelhausen, E., & Kuzmanova, S. (2014). Physical and sensory properties of ready to eat apple chips produced by osmo-convective drying. *Journal of Food Science & Technology*, 51(12), 3691-3701.

Zhu, Y., Pan, Z., McHugh, T. H., & Barrett, D. M. (2010). Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. *Journal of Food Engineering*, 97(1), 8-16.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 1, Apr. May. 2020, p. 57- 72

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1399 ص. 72-57

Textural profile analysis (TPA) of dried apple slices using infrared radiation with intermittent heating method

H. Sabbaghi[1], A. M. Ziaiifar[2*], M. Kashaninejad[3]

Received: 2018.04.10
Accepted: 2019.06.29

Introduction: Fruits and their products in the dried form are good sources of vitamins, energy and minerals. However, during the process of drying or dehydration there are changes in quality parameters in dried products. Texture is one of the most important quality attributes of fruits during drying, reflecting their mechanical and microstructural properties. Apple is perishable fruit. Drying of apple is very important because of High losses are experienced during the seasonal glut. A novel process in food industry is the simultaneous infrared dry blanching and dehydration operation (SIRDBD) with intermittent heating method (radiation at constant temperature) exerted on fruits and vegetables that is known to enhance the quality of the final product. In the food industry, end-products must achieve a compromise between several properties, including sensory, sanitary and technological properties. Prediction of changes in texture during drying could be helpful in a better process control and improvement in overall acceptability of a dried snack food. The change of the elastic or viscoelastic texture of the fresh apples to rigid, fragile and brittle in the apple chips were evaluated by instrumental and sensory methods. Many attempts have been made to describe the viscoelastic behavior of dehydrated fruits and vegetables. Maxwell's or compression models are limited to homogeneous, isotropic materials. In contrast, texture profile analysis (TPA) is more suitable for heterogeneous biological materials and shows a good correlation with organoleptic evaluation. Typical TPA parameters are including hardness, adhesiveness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience. In this research, for the first time, textural analysis of dried apple slices by infrared heating at different temperatures and different moisture levels was performed. Finally, the optimum texture and overall acceptance of the product are described according to the instrumental analysis.

Materials and methods: Apples (Golden Delicious variety) were purchased from a local market and kept in 0°C±1°C and relative humidity ranging from 90% to 95%. Before every thermal processing, the apple specimens were picked up from the cold storage and then they were put into use after reaching the ambient temperature. The samples were skinned manually and then cut into slices with different thicknesses of 5mm, 9mm and 13mm, all 20mm in diameter. The sliced apples were immediately subjected to simultaneous blanching and infrared drying. The texture of dehydrated apple slices using infrared radiation at three surface temperatures of 70, 75 and 80 °C were studied. The product in three thicknesses was dried to achieve a moisture level of 15, 20 and 25% wet weight basis. Then, texture profile analysis (TPA) was carried out to 50% compression strain using texture analyzer. The sensory evaluation of dried slices was also considered for desire texture (Good mouth feels texture, lack of hard tissue, no shrinkage) and overall acceptance (The final acceptability of the product in terms of total sensory properties including color, texture, flavor and aroma) by 10 professional panelists. For statistical analysis, a completely randomized design (CRD) was used in a factorial form (3^3) and Duncan test with 95% confidence level.

Result & Discussion: The results showed that drying to studied moisture levels reduced the hardness and adhesiveness and increased springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience in comparison with raw apple tissue. Hardness of samples dried at higher temperature was higher due to rapid removal of moisture which might have caused collapse of capillary voids inside the product. Due to shrinkage samples became denser and thus a larger fracture force was to be expected. As water content increases (i.e., higher RH) water plasticizes the cell walls and the material and product becomes softer and more pliable, thus hardness decreases. The increase of hardness could be because the rapid mass transfer that damaged the membrane and cell structure of the fruits during drying. Another important factor responsible for the increase of hardness of finish-dried samples is the low final moisture content when compared with other samples. High temperature drying method enables samples to reach low moisture content at relatively short duration and therefore the product with harder texture was obtained. The maximum value of adhesiveness was observed for fresh

---

1. Ph. D. Graduated of Food Processing Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources,
2. Associate Professor of Food Processing Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources.
3. Professor of Food Processing Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources.
(*- Corresponding Author Email: ziaiifar@gmail.com)

apples, which could be attributed to the high moisture and sugar content. Adhesiveness decreased with moisture loss, indicating the availability of free water on the sample surface. A significant decrease in springiness following high-temperature drying could be attributed to the glass transition phenomenon and changes from elastic to plastic behavior. In the period of softening, cohesiveness increased with moisture loss. Hardening caused a decrease in cohesiveness depending on the drying temperature. Gumminess is the energy required to disintegrate a semisolid food to a state of readiness for swallowing. High values of gumminess revealed “firm” and “crisp” with a cell rupture mode of tissue failure and lowest values of gumminess could be classified as “soft”. At the end of drying and with apple hardening, chewiness increased to values equal or above initial chewiness, indicating that a larger amount of energy is needed to masticate dried apples. Resilience had increasing with moisture loss. By increasing the thickness of the slices, the cohesiveness and springiness decreased and hence chewiness significantly decreased. The overall acceptance and desire texture in dried samples was observed at lower water evaporation rate conditions (lower temperatures, lower thickness and higher moisture content). In these conditions, the hardness of apple slices tissue was equal to 695.177 ± 7.685 grams. During drying of the apple, textural behavior was varied from the viscoelastic (higher initial hardness, with cohesiveness, springiness and lower resilience) to elastic and then to plastic or glassy.

Keywords: Drying, Texture profile analysis, Apple, Infrared radiation, Sensory evaluation